

## РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТСЕКОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

*И.А. Щуров, А.В. Федоров, В.Б. Федоров*

Предложены методики расчета отклонений от прямолинейности, плоскостности, круглости, смещений торцов отсеков летательных аппаратов при их сборке на основе координат точек, полученных от электронно-оптического координатно-измерительного устройства. На основе методик разработана компьютерная программа, с использованием которой решен ряд контрольных примеров с параметрами, полученными от САД-системы. Показано, что данные методики позволяют получить требуемые параметры для контроля качества изготовления летательных аппаратов.

*Ключевые слова:* координатные измерения, отклонения от прямолинейности, плоскостности и круглости, смещения отсеков в сборке.

### Введение

Современные летательные аппараты (ЛА) имеют, как правило, блочно-модульную конструкцию. Ступени ракет-носителей, крупнопанельные элементы фюзеляжей самолетов, двигательные установки, несущие и управляющие аэродинамические поверхности, – все эти узлы на завершающем этапе производства должны быть собраны с минимальной подгонкой. Кроме того, при изготовлении крупногабаритных тонкостенных элементов отсеков ЛА зачастую применяются различные виды сварных соединений. Процесс сварки сопровождается высокотемпературным нагревом металла, после остывания которого сваренные детали могут существенно деформироваться и сборка их в единый узел вызывает трудности с обеспечением точности сопряжений. Нежесткие крупногабаритные элементы конструкции ЛА могут деформироваться и под действием собственного веса, что также может стать препятствием для правильной собираемости конструкции. Наряду с этим, значительная деформация элементов конструкции ЛА неизбежно приводит к нарушению распределения массо-геометрических характеристик изделия относительно заданных проектных значений. В ряде конструкций ЛА крупные узлы должны совершать взаимные перемещения для создания управляющих сил и моментов. Качество управления будет существенно зависеть от степени точности знания действительных размерных параметров изделия, определяющих взаимное расположение узлов ЛА после сборки. Для геометрического контроля фактических значений размерных параметров отдельных модулей ЛА и таких ЛА в сборе целесообразно использовать переносные электронно-оптические координатно-измерительные устройства. Эти устройства позволяют получить координаты точек заданных поверхностей рассматриваемых изделий на больших расстояниях. Точность переносных электронно-оптических координатно-измерительных устройств в сравнении со стационарными координатно-измерительными машинами заметно ниже, однако она вполне достаточна для измерения геометрии крупногабаритных ЛА. К числу устройств, которые могут быть использованы для подобных целей, относится электронно-оптическое переносное координатно-измерительное устройство Metronor DUO. Это устройство позволяет получить координаты точек на расстояниях до 15 м с точностью координат в пределах  $\pm(0,025 + L/60\ 000)$  мм, где  $L$  – измеряемое расстояние. Очевидно, что для размеров изделия до 10 м этот параметр не превысит 0,2 мм, что, с учетом имеющихся норм для выбора средств измерений, намного ниже традиционно применяемых для этих размеров допусков до 1 мм включительно. Другим достоинством рассматриваемого средства контроля являются его паспортные требования к окружающей среде, которые позволяют использовать это средство непосредственно в цехе. Таким образом, применение Metronor DUO в цехе, где происходит общая сборка ЛА, является и достаточным, и целесообразным. В частности, общеизвестен опыт применения подобных устройств в аэрокосмической промышленности США и Европы. Так, например,

## Контроль и испытания

Metronog был использован при проверке стыковочного узла служебного модуля американского сегмента Международной космической станции.

Устройства типа Metronog позволяют найти координаты точек на измеряемых поверхностях. Вместе с тем, общеизвестно, что на операциях геометрического контроля деталей и сборок координаты таких точек без их последующей математической обработки не представляют интереса. Как правило, на чертежах деталей и сборок устанавливаются размеры и их допуски, задаются технические требования на отклонения формы и расположения поверхностей. Применительно к отсекам ракет-носителей, это, прежде всего, нормирование отклонений от прямолинейности, плоскостности, круглости. Кроме того, сборка отсеков сопровождается сопряжением их торцов, которые, очевидно, должны удовлетворять определенным требованиям по их плоскостности. После сопряжения отсеков изделие должно иметь прямолинейную образующую боковой поверхности. Наконец, очевидно, что при сопряжении торцов двух отсеков из-за отклонений их внешних контуров от заданной чертежом формы необходимо обеспечить минимальное выступание таких контуров друг относительно друга. Такая минимизация возможна за счет оптимального смещения торца одного отсека относительно второго в пределах монтажных зазоров базирующих и крепежных элементов конструкции стыка.

Все эти задачи требуют разработки соответствующих методик расчета указанных параметров на основе координат точек, полученных посредством использования координатно-измерительного устройства. Именно такие методики и программное обеспечение представлены в данной работе.

### Расчетные методики

Ниже последовательно рассматривается четыре методики расчета отклонений: от прямолинейности, плоскостности, круглости и смещений торцов отсеков ЛА.

#### Расчет отклонения от прямолинейности

1. На длине нормируемого участка контролируемого профиля выбирается  $m$  узловых точек. Посредством Metronog DUO устанавливаются их координаты  $X_i, Y_i, Z_i$  ( $i=1..m$ ). В качестве примера предлагается рассмотреть методику расчета отклонения от прямолинейности только в горизонтальной плоскости стрингерного набора отдельного отсека. В этом случае вертикальные координаты  $Z_i$  значения не имеют, и контрольные точки следует выбрать примерно на одной высоте от горизонтальной базы этого отсека.

2. После таких измерений далее по всему множеству  $m$  последовательно выбирается по две точки. В качестве первой точки расчета выбираются последовательно  $m-1$  точка (за исключением последней). В качестве второй точки выбираются последовательно все оставшиеся  $m-1$  точки.

3. Определяется уравнение прямой по формуле

$$(Y_2 - Y_1) X + (X_1 - X_2) Y + (Y_1(X_2 - X_1) - X_1(Y_2 - Y_1)) = 0 \quad (1)$$

или

$$A X + B Y + C = 0,$$

где  $X_i, Y_i$  – координаты двух выбранных ( $i=1, 2$ ) точек профиля и  $A = (Y_2 - Y_1)$ ;  $B = (X_1 - X_2)$ ;  $C = Y_1(X_2 - X_1) - X_1(Y_2 - Y_1)$ .

4. Определяется расстояние от прямой до остальных  $m-2$  точек множества по формуле

$$d = A M X + B M Y + C M, \quad (2)$$

где  $M = M^*$  для  $C < 0$  и  $M = -M^*$  для  $C > 0$ ;  $M^* = 1/\sqrt{A^2 + B^2}$ .

5. Далее реализация методики зависит от расположения принятой системы координат. Прием для определенности ее положение над исследуемым профилем, т. е. вне тела детали. В этом случае у прямой, для которой все оставшиеся точки имеют расстояния  $d \geq 0$ , что соответствует расположению прямой и начала системы координат по одну сторону от исследуемой точки, и, соответственно, одностороннему расположению всех точек профиля по отношению к данной прямой, определяется максимальное расстояние  $d_{\max} \geq 0$ . Очевидно, что в случае расположения начала системы координат под рассматриваемым профилем, т. е. в теле детали, следует принимать  $d \leq 0$ .

6. Из всех максимальных расстояний  $d_{\max}$  определяется наименьшее, которое, в соответствии с ГОСТ 24642–81, показывает и прилегающую прямую, и максимальное отклонение от прямолинейности, как это показано на рис. 1.

#### Расчет отклонения от плоскостности

1. На нормируемом участке контролируемой торцевой плоскости отсека выбирается  $m$  узловых точек. Посредством Metronog DUO устанавливаются их координаты  $X_i, Y_i, Z_i$  ( $i=1..m$ ).

2. Далее последовательно выбирается по три точки аналогично предыдущему случаю (п. 2).

3. Для выбранных трех точек уравнение плоскости имеет вид:

$$\begin{vmatrix} X - X_1 & Y - Y_1 & Z - Z_1 \\ X_2 - X_1 & Y_2 - Y_1 & Z_2 - Z_1 \\ X_3 - X_1 & Y_3 - Y_1 & Z_3 - Z_1 \end{vmatrix} = 0. \quad (3)$$

4. Определяются расстояния  $d$  от плоскости до оставшихся  $m-3$  точек, для чего последнее уравнение по известным в математике преобразованиям приводится к виду:

$$AX + BY + CZ + D = 0; \quad (4)$$

$$d = \mu AX + \mu BY + \mu CZ + \mu D, \quad (5)$$

где  $\mu = \xi$  для  $D < 0$  и  $\mu = -\xi$  для  $D > 0$ ;  $\xi = 1/\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$ .

5. В данном месте справедливы приведенные выше применительно к прилегающей прямой замечания по расположению начала системы координат (см. п. 5). Примем и здесь, что начало системы координат лежит вне детали. Для случая, когда все величины  $d \geq 0$ , что соответствует одностороннему расположению всех точек поверхности по отношению к данной плоскости, определяется максимальное значение  $d_{\max}$ .

6. Из всех  $d_{\max}$  определяется наименьшее значение, для которого, в соответствии с ГОСТ 24642–81, и находится прилегающая плоскость, как это показано на рис. 2.

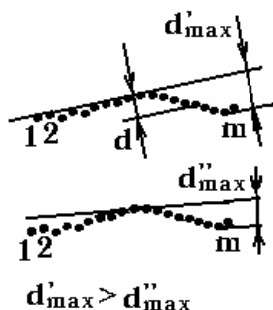


Рис. 1. Схема для определения отклонения от прямолинейности (в качестве примера даны две прямые и их отклонения:  $d'_{\max}$  и  $d''_{\max}$ )

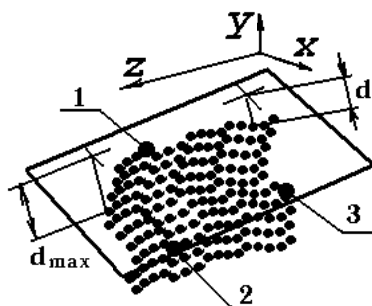


Рис. 2. Схема для определения отклонения от плоскостности

#### Расчет отклонения от круглости

1. На лицевой поверхности шпангоута, изогнутого по дуге окружности, выбирается  $m$  узловых точек. Посредством Metronog DUO устанавливаются их координаты  $X_i, Y_i, Z_i$  ( $i=1..m$ ). Известно, что для однозначного определения параметров дуги окружности достаточно трех точек, однако, учитывая технологические отклонения и возможные деформации, рекомендуется использовать большее число таких точек на поверхности шпангоута. Рациональное число этих точек может быть определено только на практике, в том числе, с учетом требований по производительности операции контроля.

2. Далее последовательно выбирается по три точки: первая от 1 до  $m-2$ , вторая из оставшихся после первой точек, и третья из оставшихся после первых двух точек.

3. Для трех точек определяется центр окружности и ее радиус:

$$X_0 = ((X_2^2 + Y_2^2) Y_3 - (X_3^2 + Y_3^2) Y_2) / (2(X_2 Y_3 - X_3 Y_2)); \quad (6)$$

## Контроль и испытания

$$Y_0 = ((X_3^2 + Y_3^2) X_2 - (X_2^2 + Y_2^2) X_3) / (2(X_2 Y_3 - X_3 Y_2)); \quad (7)$$

$$R = \sqrt{(X_{1\phi} - X_0)^2 + (Y_{1\phi} - Y_0)^2}; \quad (8)$$

$$X_i = X_{i\phi} - X_{1\phi}; \quad Y_i = Y_{i\phi} - Y_{1\phi}, \quad (9)$$

где  $X_{i\phi}$ ,  $Y_{i\phi}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) – координаты трех точек, через которые проходит окружность.

4. Выполняется преобразование переноса системы координат в центр окружности и определение новых координат всех точек множества  $m$ :

$$X^* = X_{\phi} - X_0; \quad (10)$$

$$Y^* = Y_{\phi} - Y_0. \quad (11)$$

5. Определяется отклонение для всех  $m$  точек по формуле

$$d = R - \sqrt{(X^*)^2 + (Y^*)^2}. \quad (12)$$

6. Для окружности, у которой все величины  $d \geq 0$ , что соответствует одностороннему расположению всех точек профиля по отношению к данной окружности, определяется наибольшее значение  $d_{\max}$ . Минимальное значение  $d_{\min}$ , в соответствии с примечанием п. 1.15 ГОСТ 24642–81, для всех окружностей определяет прилегающую окружность и ее наибольшее отклонение от круглости.

### *Расчет смещения сопрягаемых торцовых профилей отсеков*

Как было отмечено выше, для наиболее точного соединения отсеков необходимо, чтобы отдельные сопрягаемые участки торцов каждого отсека имели минимальное смещение относительно друг друга. Если в качестве базовых принять участки профиля в окрестности, например, левого контура торца сопрягаемого отсека (от точки 1 и выше, рис. 3), то выравнивание отсеков по этим участкам, в общем случае, вызовет максимальные величины смещений контура торца отсека на его правой стороне (от точки 4 и выше, рис. 3). Поэтому целесообразно в качестве условия выравнивания принять, чтобы максимальные рассматриваемые отклонения и справа, и слева были равны между собой, и, очевидно, что в таком случае они будут минимальными среди других случаев выравнивания. Такое условие могло бы быть легко выполнимым в случае, если бы наружные контуры торцов отсеков были бы строго симметричными, однако фактически такие контуры всегда имеют сложную несимметричную форму.

Для получения требуемой математической модели необходимо выбрать контрольные участки.

Не вызывает сомнений, что увеличение количества таких участков даст наиболее точное решение. Однако выполнение большого числа измерений также, как правило, нецелесообразно, поскольку это увеличивает время работы контролеров, и, следовательно, увеличивает издержки производства. Исходя из этого, было принято за основу производить оценку по трем участкам с каждой стороны торца, как это показано на рис. 3.

Данный подход представляется целесообразным еще и потому, что такие три участка позволяют оценить не только отклонения по типу параллелограмма или трапеции для сопряжения торцов отсеков, но и использовать полученные координаты сразу и для оценки перечисленных ранее видов отклонений: отклонения от круглости и прямолинейности. Предлагается выбрать необходимые точки контроля в местах присоединения к шпангоуту трех стрингеров, как это показано на рис. 3.

Таким образом, требуется на каждом отсеке произвести по три измерения на каждой из двух

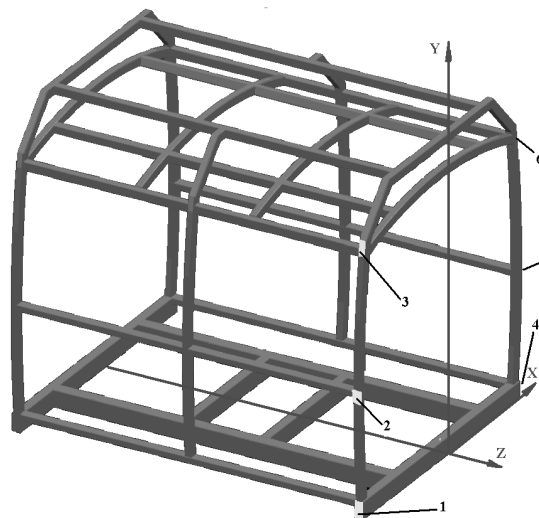


Рис. 3. Выбор участков для получения контрольных точек

его боковых сторон. Всего на двух соединяемых отсеках необходимо выполнить 12 измерений, и, следовательно, получить координаты 12 точек. Для упрощения дальнейших расчетов целесообразно всегда соблюдать одинаковый порядок обхода, например, как это показано выше на рисунке: снизу-вверх на левой стороне каждого из сопрягаемых отсеков и аналогично на их правой стороне.

В этом случае будут получены следующие 12 троек координат:  $(X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij})$ , где  $i = 1 \dots 6$ ;  $j = 1, 2$  – номера двух отсеков.

1. Для определенности примем, что смещения производятся вдоль координаты  $X_{ij}$ , направленной горизонтально вдоль торца отсека. Тогда в данном случае координаты  $Y_{ij}$  и  $Z_{ij}$  не представляют интереса для расчетов.

2. На следующем этапе определяются величины отклонения абсцисс  $X_{ij}$  по каждому из сопрягаемых контрольных участков  $i$  данных двух отсеков:

$$\Delta_i = X_{i1} - X_{i2}. \quad (12)$$

3. Из всех полученных отклонений  $\Delta_i$  выбираются максимальное и минимальное отклонения. Правила поиска таких значений общеизвестны: для каждого выбранного  $\Delta_i$ , если  $\Delta_i > \Delta_{\max}$ , то принимается  $\Delta_{\max} = \Delta_i$ , где первоначально принимается  $\Delta_{\max} = -10^{99}$  – заведомо малая величина. Аналогичное правило поиска минимальной величины: для каждого выбранного  $\Delta_i$ , если  $\Delta_i < \Delta_{\min}$ , то  $\Delta_{\min} = \Delta_i$ , где первоначально принимается  $\Delta_{\min} = 10^{99}$  – заведомо большая величина.

4. Найденные максимальное и минимальное отклонения позволяют рассчитать величину сдвига второго отсека относительно первого, который, в свою очередь, должен быть неподвижным.

$$\Delta_c = (\Delta_{\max} + \Delta_{\min}) / 2. \quad (13)$$

### Разработка программы и расчеты контрольных примеров на ЭВМ

На базе полученных методик расчета была разработана компьютерная программа (рис. 4).

Расчет отклонений формы и расположения поверхностей отсеков

Выбор типа задачи контроля:

**Отклонения формы поверхностей**

Прямолинейность  Плоскостность  Круглость

**Отклонение расположения**

Отклонение расположения торцов

Введите последовательно координаты X трех точек на левой стороне каркаса отсека 1:

X1 0,100 X2 0,200 X3 0,350

Введите последовательно координаты X трех точек на правой стороне каркаса отсека 1:

X4 1,200 X5 -0,200 X6 0,000

Введите последовательно координаты X трех точек на левой стороне каркаса отсека 2:

X7 0,400 X8 -0,600 X9 0,200

Введите последовательно координаты X трех точек на правой стороне каркаса отсека 2:

X10 0,300 X11 0,100 X12 -0,800

Рассчитать

Обнулить ИД

Имеются отклонения: -0.300 0.800 0.150 0.900 -0.300 0.800

Необходимо сдвинуть 2-й каркас вправо на 0.300 мм.

Получим отклонения: -0.600 0.500 -0.150 0.600 -0.600 0.500

Помощь

Close

Рис. 4. Окно программы расчета отклонений

## Контроль и испытания

Для программы по приведенным в табл. 1 данным были получены результаты для прямолинейности, плоскостности и круглости, а по данным из табл. 2 – данные по смещению отсеков.

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчетов первых трех видов отклонений, мм

№	Координаты точек, полученные измерениями			Результаты расчета
	$X$	$Y$	$Z$	
Отклонение от прямолинейности				
1	524,204	055,796	–	Отклонение: 0,052
2	213,785	025,301	–	
3	–000,185	004,192	–	
Отклонение от плоскостности				
4	000,000	000,000	053,117	Отклонение: 5,638
5	300,000	000,000	074,272	
6	000,000	150,000	074,629	
7	300,000	150,000	090,074	
Радиус окружности и отклонение от круглости				
8	000,000	100,000	–	Координаты центра окружности: 2,559 и 4,225
9	015,367	100,000	–	
10	029,660	095,500	–	Радиус окружности: 95,809
11	045,884	089,679	–	
12	058,072	081,825	–	
13	067,471	073,370	–	Наибольшее отклонение от круглости: 0,994
14	073,863	066,819	–	
15	083,184	055,984	–	
16	091,054	043,459	–	
17	096,219	027,237	–	

Таблица 2

Исходные данные и результаты расчетов смещений отсеков, мм

№	$N$	Абсциссы каждой стороны торца			Результаты расчета
		$X_{1+N}$	$X_{2+N}$	$X_{3+N}$	
1	0	0,100	0,200	0,350	Максимальная величина смещения до сдвига: 0,800
2	3	1,200	–0,200	0,000	Необходимое смещение второго отсека: 0,300
3	6	0,400	–0,600	0,200	Направление сдвига – вправо
4	9	0,300	0,100	–0,800	Максимальная величина смещения после сдвига: 0,60

Данные примеры были смоделированы с использованием CAD программы SolidWorks, в которой по расчетным точкам были построены прилегающие кривые и поверхности. Результаты полученных отклонений полностью совпали с приведенными в таблицах, что доказывает корректность полученных методик расчета.

### Вывод

Полученные методики расчета отклонений от прямолинейности, плоскостности, круглости и методика расчета смещений торцов при использовании переносного электронно-оптического координатно-измерительного устройства типа Metronor DUO являются достаточными для получения требуемых параметров контроля качества изготовления отсеков и сборок ЛА.

**Щуров Игорь Алексеевич.** Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск). Тел.: +7(351) 267-91-11; shia@susu.ac.ru.

**Федоров Артем Викторович.** Аспирант кафедры «Автоматизация механосборочного производства», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск). Тел.: +7(351) 267-97-74; freenam@mail.ru.

**Федоров Виктор Борисович.** Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация механосборочного производства», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск). Тел.: +7(351) 267-97-74; vbf64@mail.ru.

---

**Bulletin of the South Ural State University  
Series "Mechanical Engineering Industry"  
2013, vol. 13, no. 2, pp. 125–131**

---

## **CALCULATION OF AIRCRAFT CARCASS GEOMETRICAL PARAMETERS ON THE BASE COORDINATE MEASUREMENT**

*I.A. Shchurov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, shia@susu.ac.ru,  
A.V. Fedorov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, freenam@mail.ru,  
V.B. Fedorov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, vbf64@mail.ru*

Calculation methods of the straightness, flatness and circularity deviations is offered. Calculation method of the aircraft carcass displacement is offered too. All methods were based on coordinates of points that get from an electro-optical portable coordinate measuring device. Using these methods computer program was made. Some examples were calculated and compared with data from CAD models. Such methods allow to get parameters to control carcasses of aircraft and assemble them into section.

*Keywords: coordinate measuring, straightness, flatness and circularity deviations, carcass displacement into assembling.*

*Поступила в редакцию 17 сентября 2013 г.*